УДК 621.397.68:629.05:535

СТАТИСТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СРЕДСТВ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ", г.Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

На основе статистической теории дано определение пороговых значений предельной и контрастной чувствительности оптических сканирующих измерительных средств. Показано, что их предельная чувствительность в режиме обнаружения определяет пороговый уровень светового потока от объектов, контроль параметров которых может быть осуществлен в режиме слежения. Учтено влияние интенсивности светового потока на оценку оптимального размера покрытия пространства и фрактальную размерность изображения. Исследовано влияние на вейвлет-характеристику изображения фона изменения размеров фрактального изображения объекта для ортогонального разложения сигнала изображения по базисам вейвлета.

С момента создания самых первых преобразователей оптического излучения и до настоящего времени стремление к обеспечению предельных возможностей приемников излучения (ПИ) измерительных средств является актуальным [1–10]. Их оценка и сравнение производятся с привлечением понятий потенциальной и контрастной чувствительности уже более полувека [2–6]. Для количественной оценки качества систем по этим критериям чувствительности используется отношение "сигнал/шум", определяющее минимальное значение регистрируемого системой оптического сигнала, ограничиваемого шумовыми факторами той или иной физической природы, без учета влияния дискретизации пространства изображения ПИ [2–6, 8]. Это соответствует условиям интегрального принципа регистрации излучения и "замороженности" координат контролируемых объектов или среды, справедливых для несканирующих пространство измерительных средств.

В сканирующих измерительных системах процесс поиска и обнаружения объекта и этап последующего его контроля разделены во времени [7, 9, 10] и необнаружение объекта означает невыполнение задачи измерения его параметров. Следовательно, предельная чувствительность сканирующих оптических измерительных систем в режиме обнаружения как критерий принципиальной осуществимости выполнения контроля состояния объекта сканирующими измерительными средствами в режиме слежения являются важным, определяющим их работоспособность, фактором. Ясно, что в режиме слежения [9] при измерении параметров объекта пороговая или предельная чувствительность может быть значительно улучшена. На предельную чувствительность сканирующих систем в режиме обнаружения заметное влияние оказывают особенности алгоритмов осмотра пространства, определяющих последовательность сканирования, дискретность покрытия – поэлементного разложения пространства изображения, динамика поведения объекта контроля, априорная неопределенность величины сигнала от которого обусловлена случайностью его положения относительно элемента сканирования и ряд других факторов. Ниже проведен анализ предельных возможностей сканирующих оптических измерительных средств в режиме обнаружения, предшествующего этапу контроля параметров объекта, с учетом статистики влияния выше указанных причин на предельную чувствительность средств измерения.

Особенность обнаружения источника оптического излучения сканирующей измерительной системой состоит в том, что, за счет двумерной дискретизации поэлементного покрытия пространства изображения, относительное расположение элемента сканирования и изображения объекта в системе координат ПИ (канторово пространство) априори неизвестно. Это определяет случайность амплитуды сигнала даже при известных энергетических характеристиках объекта. Влияние динамики смещения объекта, также обусловливающей случайный характер амплитуды сигнала, приводит к появлению повторных сигналов в двух и более, в зависимости от степени соразмерности элемента и изображения объекта, смежных элементах и строках сканирования пространства изображения.

Примем, что поле изображения $h_x \times h_y$ пространства наблюдения сканируется за время $T_к$ с периодом T_c элементом разложения с относительным (по сравнению с $2r_0$-размером изображения объекта) размером $a_x \times a_y$. Модуль вектора скорости перемещения изображения объекта $|\vec{v}_0| = (v_{ox}^2 + v_{oy}^2)^{1/2}$ определяет его время пребывания в пространстве наблюдения. Так как взаимное положение элемента сканирования и изображения объекта случайно, то величина сигнала от объекта в i-ом элементе j-ой строки разложения поля определится выражением

$$I_{Cij}(x,y) = \varepsilon \iint\limits_{(ОИ)} \rho_э(x,y) I(x-x_0, y-y_0)\,dx\,dy,$$

где ε – коэффициент, учитывающий особенности преобразования "свет-сигнал" ПИ; $ОИ$ – область интегрирования равная площади взаимного перекрытия изображения объекта и элемента на ij-ом шаге сканирования; $\rho_э(x,y)$ – распределение чувствительности элемента ПИ; $I(x,y)$ – распределение интенсивности в изображении; x, y – координаты элемента сканирования; x_0, y_0 – координаты элементарных участков изображения объекта от-

носительно его условного центра. Размеры области интегрирования изменяются в соответствии с алгоритмом сканирования, размерами элемента покрытия и шагом поэлементного разложения поля изображения пространства наблюдения.

Следуя [10], в отсутствии межстрочной обработки сигналов и принятии решения об обнаружении объекта, хотя бы в одном из раздельно разрешаемых элементов сканирования поля изображения, вероятность обнаружения объекта в кадре изображения пространства наблюдения, с учетом наличия сигналов от объекта в m смежных, покрывающих изображение объекта, строках поля сканирования, найдем из уравнения

$$D_1 = 1 - 2^{-m} \int_0^{\Delta y} w(\delta_j) \prod_{j=1}^{m} \left\{ \begin{matrix} 1 - \Phi \times [(\Psi_m / \sqrt{2\pi}) \times \\ \times \int_{a_{j-1}}^{a_i} e^{-t^2/2} dt - \Psi_0] \end{matrix} \right\} d\delta_1, \quad (1)$$

где $w(\delta_j)=\Delta_y^{-1}$ – плотность распределения случайной величины $\delta_j=\delta_1+(j-1)\Delta_y$; δ_1 – размер части изображения объекта в первой из m строк поля; $\Delta_y=f(a_x;a_y)$ – параметр дискретного разложения, соответствующий эталону меры покрытия пространства изображения; Ψ_m – максимально возможное отношение "сигнал/шум" при данном наборе параметров разложения поля изображения и известных интенсивностях излучения объекта и фона; $a_j=(\delta_j/r_0-1)$; $a_{j-1}=\delta_j/r_0-a)$; $a=2r_э/2r_0$ – относительный размер элемента покрытия поля; Ψ_0 – относительный пороговый уровень, определяемый критерием обнаружения, являющийся аргументом интеграла вероятности $\Phi[.]$:

$$\Psi_0 = \arg\Phi[1 - 2F_1\tau_U(a+1)/T_к a],$$

где F_1 – вероятность ложного срабатывания; τ_U – длительность видеосигнала от изображения объекта. Это выражение учитывает, что число раздельно разрешаемых элементов покрытия поля изображения, в которых процесс обнаружения отсчетов сигнала, не перекрывающихся на интервале корреляции (равном временному интервалу занимаемому сигналом) $\tau_C=\tau_U(a+1)/a$, является независимым, определяется отношением $N_Э=T_П/\tau_C=nT_к/\tau_C$, где $T_П$ – время просмотра n кадрами поля изображения. С изменением размеров элемента покрытия поля сканирования изменяется и число раздельно разрешаемых элементов до максимально возможного числа, определяемого числом элементов покрытия поля изображения: $N_m=h_x h_y/4r_0^2$. Максимально возможное отношение сигнал/шум Ψ_m является параметром обнаружения – неслучайной величиной, численно равной отношению "сигнал/шум" на выходе согласованного фильтра, получаемом при совмещении центров изображения объекта и сканирующего элемента покрытия.

Многопараметрическое уравнение (1) устанавливает зависимость вероятности обнаружения объекта в кадре поля изображения от параметров, характеризующих, в том числе, условия обнаружения, алгоритм, траекторию и размеры элементов сканирования, статистику распределения, динамику и относительный размер изображения объекта.

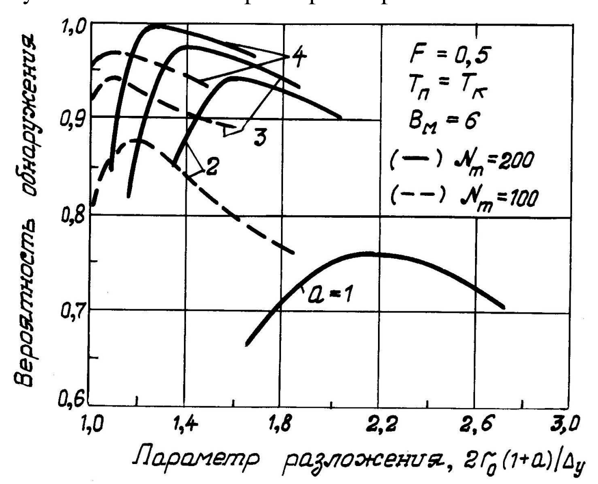


Рис. 1. *Зависимость вероятности обнаружения для элемента квадратной и круглой форм*

Так как аналитическое решение вероятностного функционала (1) получить не удалось, то на рис. 1 представлены результаты численного его решения на компьютере для элемента покрытия квадратной формы с равномерным (сплошная линия) и круглой формы (пунктир) гауссовым распределениями чувствительности. Здесь $B_M=\Psi_m(\Delta_y=2r_э)$. Влияние вариаций параметров на вероятность обнаружения в многокадровом режиме $D_n = 1 - \prod_{j=1}^{n}(1 - D_1)$ отражает таблица. Результаты численного анализа (рис. 1) показывают, что максимум отношения "сигнал/шум", адекватный точке наилучшей чувствительности систем, является необходимым, но недостаточным условием обеспечения предельной чувствительности сканирующих средств измерения на стадии обнаружения объекта. Поэтому под предельной чувствительностью в режиме обнаружения следует понимать минимальное значение освещенности или интенсивности светового потока, сосредоточенного в изображении объекта, обнаруживаемого с заданной вероятностью обнаружения при оптимальном наборе параметров системы для принятого критерия обнаружения и заданных условий ее работы. Пороговое значение интенсивности светового потока или освещенности изображения объекта определяется известными выражениями для отношения "сигнал/шум" [4, 5, 10]. Зависимости, приведенные на рис. 1, подтверждают, что выбор параметров сканирования пространства изображения, максимизирующих вероятность обнаружения, дает экстремальное, а значит, наилучшее значение предельной чувствительности сканирующей системы контроля оптически наблюдаемого объекта.

Иногда [4, 5, 10] оперируют понятием контрастной чувствительности. Предельная контрастная чувствительность сканирующих измерительных средств будет определяться минимальным значением контраста объекта на внешнем фоне, при ко-

тором объект контроля обнаруживается с требуемой достоверностью системой, имеющей оптимальный по условиям работы набор параметров. Использование в сканирующих системах режима счета фотонов, метода последовательного анализа, адаптации к фону, пространственной селекции, вейвлет- и других методов обработки оптического или электрического сигнала, являются способами повышения их предельной чувствительности. Сравнение эффективности обнаружения объекта по критерию Неймана-Пирсона одновременно двумя методами (токовым и счета фотонов) обработки сигнала представлено на рис. 2.

Таблица. *Вероятность пропуска (1–D) объекта при однокадровой $T_п = T_к$ и многокадровой $T_п = nT_к$ процедурах обнаружения ($T_п$ = const)*

Элемент квадратный равномерной чувствительности	Отношение "сигнал/шум"	Вероятность пропуска при однократном режиме	Вероятность пропуска при многократном режиме		
a	Вм	в кадре	n	в кадре	в n кадрах
2	6	$8\cdot10^{-2}$	2	0,122	$1{,}5\cdot10^{-2}$
	10	10^{-5}		$4\cdot10^{-4}$	$1{,}6\cdot10^{-7}$
3	6	$4{,}8\cdot10^{-2}$	3	0,118	$1{,}65\cdot10^{-3}$
	10	$1{,}5\cdot10^{-6}$		10^{-3}	10^{-9}
4	6	$4\cdot10^{-2}$	4	0,11	$1{,}46\cdot10^{-4}$
	10	$2{,}62\cdot10^{-7}$		$1{,}6\cdot10^{-3}$	$6{,}55\cdot10^{-12}$

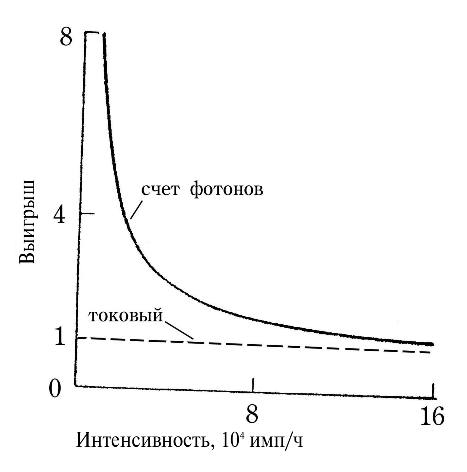


Рис. 2. *Иллюстрация преимущества метода счета фотонов по сравнению с токовым в зависимости от интенсивности потока фотонов*

Влияние вариаций статистики объекта и фона на фрактальную размерность изображения оценим с использованием [11] вейвлет-метода (W-метода) представления сигналов изображения. Для упрощения анализа путем сжатия изображения необходимо представить его в виде W-базисов с большим числом нулевых моментов. При разложении сигнала изображения в выбранный (ортогональный или другого типа) W-базис, с последующими преобразованием и интегрированием, подавляются с точностью до погрешности преобразования малоинформативные низкочастотные компоненты и сигнал представится набором W-базисов более высокого порядка. Эта сортировка значимых весовых коэффициентов разложения соответствует сжатию сигнала; чем меньше коэффициентов вейвлет-разложения остается в представлении сигнала (большее число нулевых моментов разложения), тем лучше сжатие. Принимая во внимание результаты работы [11], основанные на справедливости равенства Парсеваля разложению по ортогональным системам функций, характеристику изображения фона B_{wn} запишем в виде наиболее значимых B_{wi} коэффициентов W-разложения

$$B_{wn}^2 = \sum_{i=2}^{4} B_{wi}^2. \qquad (2)$$

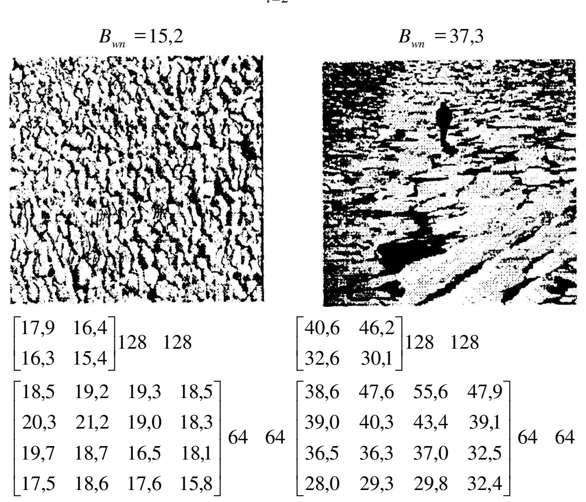


Рис. 3. *Устойчивость W-характеристики изображения фона*

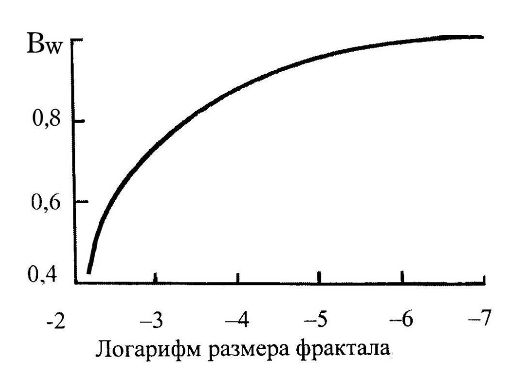


Рис. 4. *Влияние изменения фрактальной размерности на вейвлет-характеристику*

Причем в разложении изображения фона по W-базисам скорость сходимости вейвлет-коэффициентов к нулю велика: B_{w2}/B_{w0}~1/7 и B_{w3}/B_{w0}~1/20, где B_{w0} – коэффициент, отражающий среднюю интенсивность полного исходного для вейвлет-изображения фона. Для оценки степени влияния энергетических характеристик изображения фона на фрактальную размерность необходимо провести анализ закономерности поведения B_{wn} при вариациях изображения фона наблюдаемого пространства. Физически ясно, что независимость фрактальной размерности от интенсивности фона при изменении размеров изображения объекта, текстуры изображения фона и их масштабов будет соответствовать условию устойчивости W-характерис-

тики изображения фона: B_{wn}=const. Для оценки постоянства B_{wn} используем типовые (для определения адекватности получаемого результата) [11] изображения фона. Выявление закономерности поведения B_{wn} от параметров изображения проведем по методу покрытия [12] для двух наборов (64×64 и 128×128) элементов разложения пространства фрактального изображения, с вычислением значений характеристики B_{wn} и ее составляющих коэффициентов разложения (2).

В представленных на рис. 3 матрицах значений двух вариантов покрытия исходных двух типовых изображений фона заметно, хотя и незначительное (в 1,05 раза) изменение W-характеристики изображения фона при двукратном масштабировании. В принципе (с 5 % погрешностью) можно говорить об устойчивости или постоянстве B_w-вейвлет характеристики изображения фона. Влияние изменения фрактальной размерности изображения объекта постоянной интенсивности, наблюдаемого на фрактальном фоне с 25 % контрастом, представлено на рис. 4 в виде нормированной зависимости $B_w=B_{wn}/B_{w0}$ от логарифма $a_{фр.оф}=a_{фр.о}/a_{фр.ф}$ относительного размера фрактального изображения объекта по сравнению с $a_{фр.ф}$ – фрактальной размерностью изображения фона. Видно, что соотношение фрактальных размеров изображений объекта и фона при сопоставимых их величинах оказывает заметное влияние на величину наиболее значимых коэффициентов разложения сигнала изображения по базисам вейвлета.

В заключение отметим, что предельная чувствительность сканирующих средств в режиме обнаружения определяет пороговый уровень светового потока от объектов, которые могут быть с заданной достоверностью обнаружены, и слежение за которыми для измерения их параметров может быть осуществлено. Следует учитывать влияние интенсивности светового потока от объекта и фона на величину оптимального размера дискретизации покрытия пространства изображения, подтверждаемое наличием зависимости фрактальной размерности изображения от энергетических характеристик, в том числе, и статистики изображений объекта и фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутиков В.Н. История развития и состояние приемников излучения как первичных преобразователей оптических величин, сигналов и изображений // Измерительная техника. – 2002. – № 9. – С. 28–33.
2. Сытинская Н.Н. Абсолютная фотометрия протяженных объектов. – Л.: ЛГУ, 1948. – 80 с.
3. Ратнер Е.С. О пороговой чувствительности приемников излучения // Оптика и спектроскопия. – 1960. – Т. 9. – С. 101–107.
4. Гуревич С.Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 344 с.
5. Михалков К.В. Основы телевизионной автоматики. – Л.: Энергия, 1967. – 284 с.
6. Фанченко С.Д., Фролов В.А. О реальной чувствительности многокаскадных ЭОП // Приборы и техника эксперимента. – 1970. – № 2. – С. 210–212.
7. Мищенко Н.И., Слободян С.М. Экспериментальная оценка влияния параметров разложения на помехоустойчивость телевизионной автоматической системы на диссекторе // Вопросы телевизионной техники. – Томск: ТГУ. – 1975. – Вып. 1. – С. 23–28.
8. Агапов Е.С., Александрин Ю.С., Анисимов В.Ф., Поляков М.А., Птицин И.В., Романенко В.Л. Измерение пороговой чувствительности астрономической телевизионной системы с автоматической регистрацией изображения звезд // Радиотехника. – 1978. – Т. 33, № 7. – С. 57–59.
9. Слободян С.М., Сазанович В. М., Галахов В. Н. Следящая система с диссектором для измерения угловых флуктуаций оптического пучка // Приборы и техника эксперимента. – 1980. – № 4. – С. 192–194.
10. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
11. Laine A. F. Wavelet applications in signal and image processing // Proc. Society Photo-Optical Instrumentation Engineers. – 1990. – V. 2034. – P. 237–296.
12. Слободян С.М. Влияние погрешности фокусировки на оценку фрактальной размерности изображения // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 1. – С. 43–48.